

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Ivan Mateša**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Ivan Mateša

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem izv.prof.dr.sc. Mirku Jakopčiću na razumjevanju, savjetima te velikoj pomoći i uloženom trudu koje mi je pružio tijekom izrade ovoga završnog rada.

Zahvaljujem izv. prof. dr.sc.Darku Landeku na savjetima, pomoći i uloženom trudu pri izradi ispitnih uzoraka za završni rad. Također se zahvaljujem asistentu Ivanu Primorcu, mag. ing. mech. na pomoći prilikom izvođenja svih ispitivanja.

Također želim zahvaliti zaposlenicima Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na pruženoj pomoći i savjetima pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Ivan Mateša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**IVAN MATEŠA**

Mat. br.: 0035198172

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ POSTUPAKA NITRIRANJA NA OTPORNOST  
TROŠENJU CIJEVI STRELJAČKOG ORUŽJA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**INFLUENCE OF NITRIDING PROCESSES ON WEAR  
RESISTANCE OF GUNBARRELS**

Opis zadatka:

Cijev oružja je nositelj procesa opaljenja oružja, tijekom kojega dolazi do izgaranja barutnog punjenja, naglog razvoja barutnih plinova i stvaranja velike količine topline. U zatvorenom prostoru barutne komore tlak barutnih plinova naglo raste, te se stvara potrebna potisna sila na dno zrna kod streljačkog, odnosno dno projektila kod topničkog oružja, pod čijim se djelovanjem zrno/projektil kreće prema ustima cijevi. Pri izlasku iz cijevi, zrno/projektil mora postići potrebnu brzinu, usmjerenost na predviđenu balističku putanju i aerodinamičku stabilnost.

Tijekom opaljenja, u cijevi oružja se razvijaju intenzivni, međusobno interaktivni mehanički, toplinski i kemijski tribološki procesi. Njihovim djelovanjem nastaju višestruki mehanizmi trošenja materijala uzduž kanala cijevi: abrazija, adhezija, erozija i tribokorozija. U uvjetima borbenog djelovanja, uz moguće prekoračenje propisanoga režima paljbe, intenzitet mehanizama trošenja eksponencijalno raste.

Razvoj stupnja istrošenosti cijevi treba stalno pratiti, jer on utječe na promjenu balističkih, a time i taktičko-tehničkih značajki oružja. Ujedno, treba poduzimati odgovarajuće mjere u cilju povećanja otpornosti na trošenje materijala cijevi.

U ovom radu je potrebno:

1. prikazati namjenu i osnovne konstrukcijske značajke cijevi odabranog pješačkog oružja,
2. analizirati tribološke značajke procesa opaljenja i posljedice trošenja kanala cijevi,
3. objasniti način ispitivanja otpornosti na abrazijsko i adhezijsko trošenje, izbor materijala i pripremu ispitnih uzoraka,
4. provesti ispitivanje otpornosti na abrazijsko i adhezijsko trošenje nemodificiranih uzoraka, uzoraka nitriranih u solnoj kupci i uzoraka nitriranih plazma postupkom,
5. analizirati rezultate ispitivanja,
6. predložiti mjere za poboljšanje otpornosti cijevi na trošenje i dati zaključak.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Rok predaje rada:

**1. rok:** 24. veljače 2017.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.

**3. rok:** 22. rujna 2017.


Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.

**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.

**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

  
Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić

  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE CIJEVI PJEŠAČKOG ORUŽJA .....	2
2.1. Podjela pješačkog oružja.....	2
2.1.1. Pištolji .....	2
2.1.2. Automati .....	3
2.1.3. Jurišne puške.....	4
2.2. Namjena i konstrukcijske značajke cijevi.....	4
3. TRIBOLOŠKE ZNAČAJKE CIJEVI PJEŠAČKOG ORUŽJA .....	7
3.1. Trošenje cijevi oružja.....	8
3.2. Zagrijavanje i hlađenje cijevi pri gađanju.....	10
3.3. Mehanizmi trošenja cijevi.....	12
3.3.1. Abrazija.....	13
3.3.2. Adhezija .....	14
3.3.3. Erozijska česticama .....	15
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	17
4.1. Analiza uzoraka materijala.....	17
4.2. Postupci modificiranja .....	18
4.2.1. Nitiranje .....	18
4.2.2. Nitiranje u solnoj kupci .....	20
4.2.3. Plazmatsko nitiranje .....	22
4.3. Ispitivanje otpornosti na abrazivno trošenje.....	24
4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezivno trošenje .....	28
5. ANALIZA REZULTATA .....	30
5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazivno trošenje .....	30
5.1.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazivno trošenje – čelik u poboljšanom stanju .....	30
5.1.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazivno trošenje – čelik nitiran u solnoj kupci.....	31
5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezivno trošenje.....	33
5.2.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezivno trošenje – čelik u poboljšanom stanju .....	33
5.2.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezivno trošenje – čelik nitiran u solnoj kupci .....	34

---

6. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	39
PRILOZI.....	40

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Pištolj HS 2000 [13] .....	3
Slika 2.	Kratka strojnica .....	3
Slika 3.	Jurišna puška VHS-2 [15] .....	4
Slika 4.	Poprečni presjek cijevi [18] .....	5
Slika 5.	Žlijeb cijevi razvijen u ravnini x-y [18] .....	6
Slika 6.	Poprečni presjek metka [1] .....	7
Slika 7.	Presjek napunjene cijevi prije opaljenja [1] .....	8
Slika 8.	Promjena modula elastičnosti [17] .....	11
Slika 9.	Promjena temperature po presjeku cijevi [17] .....	11
Slika 10.	Dijagram kvantitativne promjene temperature cijevi po dubini stijenke cijevi [17] .....	12
Slika 11.	Jedinični događaj abrazije [11] .....	13
Slika 12.	Jedinični događaj adhezije [11] .....	14
Slika 13.	Shematski prikaz erozije česticama [11] .....	15
Slika 14.	Jedinični događaj procesa erozije česticama [11] .....	16
Slika 15.	Ispitni uzorci u nemodificiranom stanju .....	17
Slika 16.	Dijagram stanja sustava Fe-N [3] .....	19
Slika 17.	Mikrostruktura nitriranog sloja nakon nitriranja [4] .....	19
Slika 18.	Prikaz osnovnih kemijskih reakcija u solnoj kupki TF1 .....	20
Slika 19.	Dijagram postupka TENIFER [7] .....	21
Slika 20.	Shematski prikaz zone spojeva i dijela zone difuzije [3] .....	21
Slika 21.	Ispitni uzorci nitrirani u solnoj kupci .....	22
Slika 22.	Plazmatsko nitriranje vratila potopne crpke [9] .....	23
Slika 23.	a) Utjecaj temperature nitriranja, b) vremena nitriranja na tvrdoću i dubinu nitriranog sloja [2] .....	23
Slika 24.	Skica uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” [11] .....	25
Slika 25.	Uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač” .....	26
Slika 26.	Detalj uređaja i trag trošenja na uzorku [1] .....	26
Slika 27.	Ispitni uzorak nakon ispitivanja otpornosti na abraziju .....	27
Slika 28.	Vaga METTLER B5C 1000 .....	27
Slika 29.	Uređaj za ultrazvučno čišćenje .....	28
Slika 30.	Uređaj za ispitivanje faktora trenja i shematski prikaz ispitnog uzorka i prstena [7] .....	29
Slika 31.	a) uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje b) ispitni uzorci nakon ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje .....	29
Slika 32.	Srednje vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2 .....	34
Slika 33.	Srednje vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2 nitriranih u solnoj kupci .....	36

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kvantitativna analiza uzoraka [1].....	17
Tablica 2. Tvrdće uzoraka po Vickersu [1].....	17
Tablica 3. Opis ispitivanja otpornosti na abraziju.....	25
Tablica 4. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u prvom mjerenju .....	30
Tablica 5. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u drugom mjerenju .....	31
Tablica 6. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u prvom mjerenju .....	32
Tablica 7. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u drugom mjerenju .....	32
Tablica 8. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu .....	33
Tablica 9. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu .....	33
Tablica 10. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu .....	35
Tablica 11. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu .....	35



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
d	mm	kalibar cijevi
t	mm	dubina žlijeba
a	mm	širina polja
b	mm	širina žlijeba
l	mm	apsolutna dužina koraka žlijeba
$\alpha_u$	°	kut uvijanja
$F_P$	N	sila barutnih plinova na dno projektila
$F_Z$	N	sila barutnih plinova na čelo zatvarača
E	N/mm <sup>3</sup>	modul elastičnosti
t	°C	temperatura
$F_N$	N	normalna komponenta opterećenja
$F_t$	N	tangencijalna komponenta opterećenja
$\alpha$	°	kut udara čestice erozijom česticama
HV-02	HV	tvrdoća po Vickersu silom od 0.02 N
$v_u$	m/s	brzina vrtnje uzorka za erozijsko trošenje
$F_T$	N	sila trenja
$\mu$	-	faktor trenja

## SAŽETAK

U cijevi vatrenog oružja se tijekom opaljenja razvijaju intenzivni, međusobno interaktivni mehanički, toplinski i kemijski tribološki procesi. Materijal cijevi izložen je djelovanju višestrukih mehanizama trošenja materijala, poglavito njezin unutrašnji dio ili kanal cijevi, koji je u izravnom dodiru s projektilom. U radu su proučeni mehanizmi trošenja na različitim metalnim prevlakama.

Istraživanje prikazano u ovome radu provedeno je na čeliku za poboljšavanje 32CrMoV12-10, namijenjenom za izradu cijevi naoružanja. Čelik je nabavljen od dva različita proizvođača, a u radu se nastoji ispitati podudarnost njihove tribološke otpornosti u nemodificiranom i modificiranom stanju. Uzorci su razvrstani u dvije grupe: čelik 1 i čelik 2. Obje grupe uzoraka čelika modificirane su postupkom nitriranja u solnoj kupci po jedan uzorak za svaku grupu.

Kod ispitivanja otpornosti na trošenje abrazijom, ukupno je ispitano četiri uzorka. Za svaku grupu čelika, po jedan uzorak u poboljšanom stanju i po jedan uzorak nitriran u solnoj kupci. Na uzorcima su 2 traga trošenja, s tri ponovljenja mjerenja. Mjeren je gubitak mase uzorka, kao kvantitativni pokazatelj za usporedbu otpornosti ispitnih uzoraka.

Pri ispitivanju otpornosti na adhezijsko trošenje, ispitan je po jedan uzorak svake grupe u tri ciklusa (na čeličnom prstenu). Pokazatelj otpornosti je faktor trenja  $\mu$ , postignut na dodirnoj površini između uzorka i ispitnog prstena

Ključne riječi: cijev, čelik, ispitni uzorci, mehanizmi trošenja

## SUMMARY

Inside a gunbarrel there are complex mechanical, thermal and chemical processes during firing. Material of the gunbarrel is exposed to multiple wear mechanisms, especially the inner part of the bore, which is in direct contact with the projectile. Several wear mechanisms, on different types of coatings, are studied in the paper.

Research has been done on 32CrMoV12-10 steel which is used as a material for barrel production. Test samples are acquired from the two different manufacturers and are divided in two separate groups. Samples are quenched, tempered and stress relief annealed.

During the examination of abrasion, four samples were tested, one of each group was stress relief annealed and the other was nitrated. Examinations were repeated three times. Mass loss was measured as a quantitative analysis for comparing indices of abrasion.

While testing adhesion resistance, one sample of each steel group was examined in the cycles (on steel test ring). Adhesion resistance index is coefficient of friction  $\mu$  achieved on the contact surface between test sample and test ring.

Key words: barrel, steel, test samples, wear mechanisms

## 1. UVOD

Cijev oružja nositelj je procesa opaljenja oružja, tijekom kojega dolazi do izgaranja barutnog punjenja, naglog razvoja barutnih plinova te velike količine topline. U zatvorenom prostoru barutne komore tlak barutnih plinova naglo raste, te se stvara dovoljno velika potisna sila na dno zrna pri procesu opaljenja, pod čijim se djelovanjem projektil kreće prema ustima cijevi. Pri izlasku iz cijevi, zrno mora postići potrebnu brzinu i aerodinamičku stabilnost. Takva potrebna svojstva mu daje unutarnje ožljebljenje.

Iz ovoga slijedi da se tijekom opaljenja u cijevi oružja razvijaju intenzivni, međusobno interaktivni mehanički, toplinski, kemijski i tribološki procesi. Njihovim djelovanjem nastaju višestruki mehanizmi trošenja materijala uzduž kanala cijevi: abrazija, adhezija, erozija, tribokorozija.

Razvoj stupnja istrošenosti cijevi treba stalno pratiti, jer on utječe na promjenu balističkih i taktičko-tehničkih značajki oružja.

Ovaj rad sadrži šest poglavlja u kojima je opisana namjena i osnovne konstrukcijske značajke pješačkog oružja. Analizirane su tribološke značajke procesa opaljenja i procesa trošenja kanala cijevi pješačkog oružja. Objašnjen je način ispitivanja otpornosti na abrazijsko i adhezijsko trošenje, izbor materijala i priprema ispitnih uzoraka. Provedeno je ispitivanje na abrazijsko i adhezijsko trošenje nemodificiranih uzoraka, uzoraka nitriranih u solnoj kupci. Dobiveni rezultati detaljno su analizirani te tablično prikazani. Radi boljeg praćenja i razumijevanja sazrčaja, rad je ilustriran slikama, dijagramima i tablicama.

## 2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE CIJEVI PJEŠAČKOG ORUŽJA

Pješačko oružje je skup sredstava ratne tehnike koja paljbenim djelovanjem izvršava različite zadaće. Namjena im je osobna zaštita, uništavanje i onesposobljavanje neprijateljske žive sile i ratne tehnike, za ciljeve u zraku i za blisku borbu u napadu i obrani. Kao takvo, pješačko naoružanje je još uvijek najmasovnije oružje suvremenih vojski. Odlikuje ga dostatna bojevna moć, uz pouzdan rad i jednostavnost obuke i uporabe. Oružja kod kojih se rad barutnih plinova u većem dijelu koristi za potiskivanje zrna, a u manjem dijelu za rad dijelova automatike, nazivamo automatskim oružjima. Tipovi pješačkog naoružanja razlikuju se po njihovom kalibru, tj. unutrašnjem promjeru cijevi i režimu paljbe. Kalibar određuje vatrenu moć, veličinu samog oružja, domet i veliku većinu taktičko-tehničkih značajki, dok režim paljbe može biti pojedinačni, poluautomatski i automatski. Automatske ili jurišne puške, kao individualno oružje, namijenjene su za borbu na udaljenostima 400-600 m, a kod združene paljbe više strijelaca djeluje na daljinama do 800 m. Mogu gađati pojedinačnom paljbom i kratkim rafalima. Spremnici su kapaciteta do 30 metaka. [16,17].

### 2.1. Podjela pješačkog oružja

Ovisno o borbenoj namjeni, pješačko se oružje dijeli na:

- Pištolje
- Automate
- Puške
- Puškomitraljeze
- Mitraljeze

#### 2.1.1. Pištolji

Pištolji su individualno oružje džepnog formata, namijenjeno za neposrednu obranu ili napad. Uvedeni su u naoružanje kao zamjena revolverima, kojima se, zbog sporog ponovnog punjenja, ostvaruje mala praktična brzina gađanja. Revolveri se razlikuju od pištolja po tome što imaju bubanj sa gnijezdima za smještaj metaka, dok pištolji imaju okvir kapaciteta od 7 do 20 metaka [17].



**Slika 1. Pištolj HS 2000 [13]**

Suvremeni pištolji (slika 1) su poluautomatska oružja. Postoje i modeli čiji mehanizmi osiguravaju i automatsku i poluautomatsku paljbu. Iz pištolja se može uspješno gađati do 50 metara. Kod svih suvremenih pištolja konstrukcijski je osigurano da se zadržaćem zaustavi zatvarač u zadnjem položaju kada se ispali zadnji metak. To omogućuje bržu zamjenu spremnika i povećava praktičnu brzinu gađanja [17].

### **2.1.2. Automati**

Automat je individualno automatsko oružje na bazi pištoljskog metka, ali sa znatno dužom cijevi nego kod pištolja i s uobičajenim kundakom za individualno oružje. Obilježava ga mogućnost gađanja rafalnom i pojedinačnom paljbom, dobra preciznost i učinkovitost do 200 metara, ubojita moć na više od 400 metara i zadovoljavajući kapacitet spremnika [17].



**Slika 2. Kratka strojnica**

### 2.1.3. Jurišne puške

Jurišna puška (slika 3) je vatreno oružje selektivne paljbe (izbor između poluautomatske, rafalne ili automatske). Jurišne puške su standard službenih pušaka dodijeljenih većini suvremenih vojski. Postoji razlika između jurišne i borbene puške. Kod jurišnih se primjenjuje streljivo manjeg kalibra, najčešće u bliskoj borbi, npr. u zatvorenom prostoru. Borbene koriste streljivo većeg kalibra, starijeg su tipa od jurišnih, te su tijekom automatske paljbe sporije. Automatska paljba se odnosi na mogućnost puške da opaljuje kontinuirano, dok se okidač drži stisnutim, "rafalna" paljba se odnosi na opaljenje dva ili tri metka tijekom jednog stiska okidača, dok poluautomatska paljba ispaljuje samo jedan metak. Prisutnost izborne paljbe na jurišnim puškama omogućuje učinkovitiju uporabu metaka za određene potrebe, a ne samo za jednu vrstu operacije, kao što je to kod automatske puške. Na taj se način štedi streljivo dok se strijelac prilagođava ciljanju mete i poboljšava učinkovitost oružja [14].



Slika 3. Jurišna puška VHS-2 [15]

## 2.2. Namjena i konstrukcijske značajke cijevi

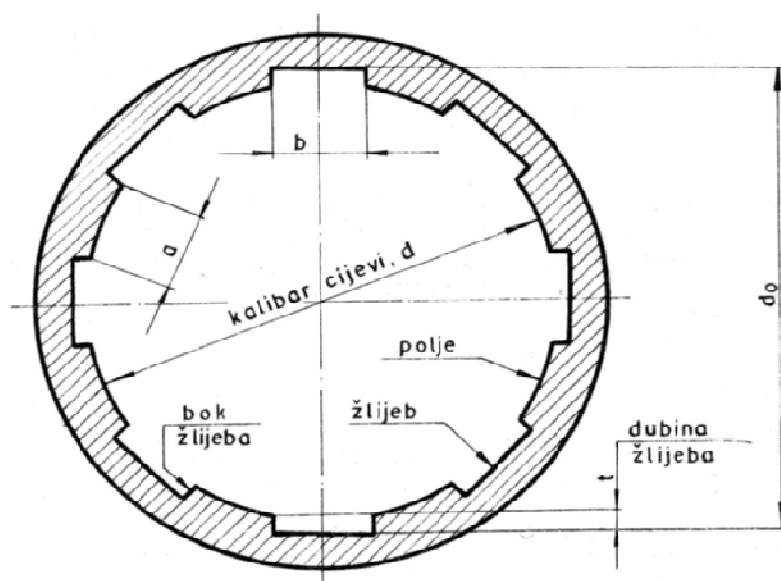
Cijev je najvažniji dio svakog oružja. Cijev ima tri funkcije: u njoj se vrši opaljenje metka, cijev daje projektilu pravac leta i omogućava mu obrnuto kretanje oko njegove osi. Unutrašnjost cijevi može biti ožljebljena ili glatka [16].

Ožljebljene cijevi vrše sve tri funkcije. U unutrašnjosti ožljebljenih cijevi razlikuju se tri zone: ležište metka, prijelazni konus i vodilište projektila. Prednji otvor ima naziv usta cijevi. Ležište metka namijenjeno je za smještaj metka po dopremanju iz spremnika. Prijelazni konus je stožasti dio unutrašnjosti cijevi na koji se projektil oslanja onim dijelom gdje mu je promjer

najveći i služi za postepeno urezivanje projektila u žljebove. Kanal cijevi je najduži, obično ožljebljeni dio unutrašnjosti cijevi, koji projektilu daje pravac i rotaciju oko njegove uzdužne osi. Žljebovi daju rotaciju koja je neophodna radi stabilnosti metka na putanji, tj. kako bi projektil stalno letio s vrhom naprijed po predviđenoj putanji projektila [16].

Cijevi automatskog oružja su malokalibarske cijevi u odnosu na cijevi artiljerijskih sistema, odgovarajuće su dimenzionirane s gledišta otpornosti materijala i nema potrebe za posebnom provjerom dimenzija cijevi u radijalnom smjeru, tj. debljine stijenke cijevi. Promatranje s takvog stajališta, bez drugih važnijih faktora koji utječu na trajnost cijevi, moglo bi navesti na pogrešan zaključak, da kod malih kalibara nema problema s cijevima tijekom eksploatacije. Naprotiv, malokalibarske cijevi kod oružja s velikom brzinom gađanja mogu se vrlo brzo potrošiti, ako se gađanje nastavi kada je cijev zagrijana na kritičnu temperaturu na kojoj dolazi do promjene mehaničkih svojstava materijala. Ta temperatura ovisi o vrsti materijala od kojeg je cijev izrađena [17].

Prikazan je poprečni presjek cijevi (slika 4) s naznačenim dimenzijama kalibra cijevi  $d$ , dubine žlijeba  $t$ , širine polja  $a$  i širine žlijeba  $b$ . Žljebovi su profilirana udubljenja u cijevi, u obliku blago zakrivljene linije [1].



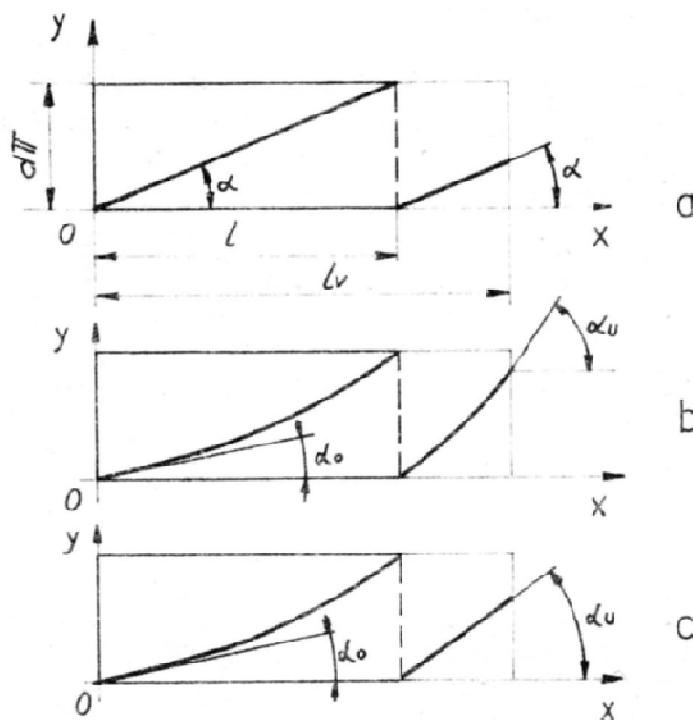
Slika 4. Poprečni presjek cijevi [18]

U modernom pješačkom oružju uvijaju se s lijeva u desno. Oblici između žljebova nazivaju se polja. Razmak između dva suprotna polja imenuje se kao kalibar cijevi. Profil žljebova je za naoružanje većeg kalibra najčešće trapeznog presjeka, ali moguće su i izvedbe pravokutnog ili



pilastog oblika. Trapezni profil se primjenjuje jer je najotporniji, te je najlakša izrada i održavanje takvog profila. Broj žljebova je proporcionalan kalibru cijevi, a mora biti djeljiv sa 4 ili 8, zbog broja noževa na glavi alata za urezivanje [18].

Žljebovi se uvijaju pod određenim kutem u odnosu na os kanala. Ako bi se cijev razrezala po jednoj izvodnici i cilindrični kanal cijevi razvio u x-y ravninu (slika 5), vodeći dio cijevi bi se vidio u obliku pravokutnika, čija je dužina  $l_v$  jednaka dužini vodećeg dijela cijevi, a visina je jednaka opsegu kalibra  $d\pi$  [18].



Slika 5. Žlijeb cijevi razvijen u ravnini x-y [18]

Veličina  $l$  je apsolutna dužina koraka žljeba. Duž apsolutne dužine koraka žljeba  $l$  zrno napravi jedan puni okretaj oko svoje uzdužne osi. Apsolutna dužina koraka žljeba važna je značajka za analizu utjecaja kuta uvijanja žljeba. Kut uvijanja žljebova može biti konstantan, progresivan i kombiniran. Ovisno o tome žlijeb razvijen u ravnini x-y biti će prikazan kao pravac, parabola ili kombinacija parabole i pravca. Veliki kut uvijanja izaziva veliki pritisak između blokova žljebova i blokova zubaca koji oblikuju na vodećem prstenu projektila. Zbog toga nastaju velike sile trenja i jako habanje tarnih površina, kako na zubima vodećeg prstena, tako i bokovima navojnih žljebova. Iz toga slijedi zaključak da kut uvijanja žljebova na ustima cijevi mora biti što manji, odnosno upravo toliko da osigura neophodnu okretnu brzinu projektila [18].

### 3. TRIBOLOŠKE ZNAČAJKE CIJEVI PJEŠAČKOG ORUŽJA

Prilikom opaljenja dolazi do najintenzivnijeg trošenja cijevi i drugih dijelova pješačkog oružja. Opaljenje predstavlja vrlo složen dinamički proces pri kojemu se kemijska energija baruta njegovim izgaranjem u vrlo kratkom vremenu pretvara u toplinsku energiju barutnih plinova, a potom u kinetičku energiju projektila.

Proces opaljenja se odvija u sustavu koji čine: cijev, projektil (metak, koji se sastoji od čahure s inicijalnom kapsulom i barutnim punjenjem na čijem vrhu je zrno, (slika 6), okidač i mehanizam za okidanje koji na koncu udarnom iglom pokrene opaljenje [1].



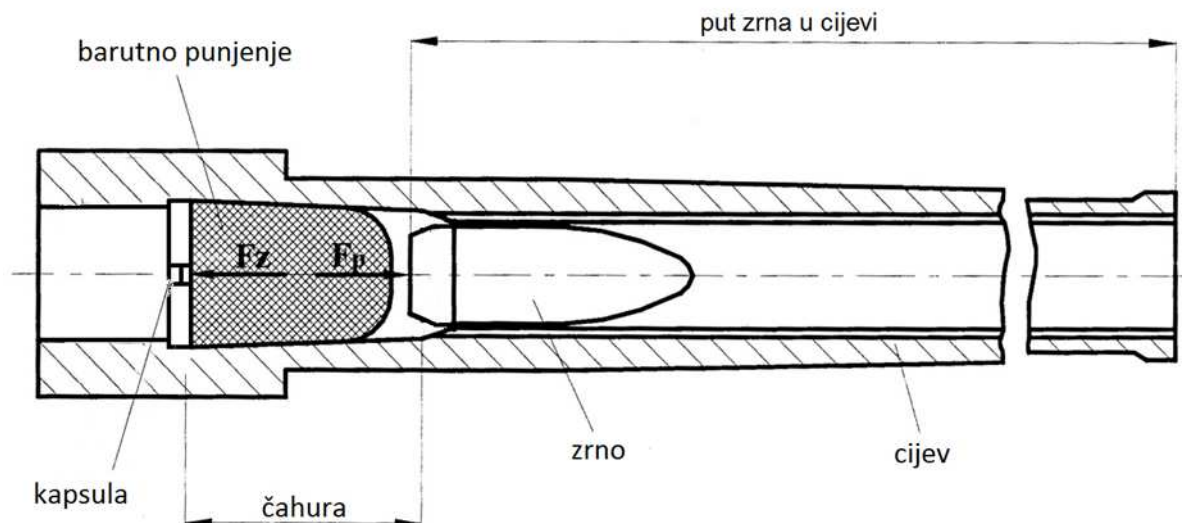
Slika 6. Poprečni presjek metka [1]

Proces opaljenja sastavljen je od tri osnovna procesa:

- proces izgaranja baruta i stvaranja barutnih plinova visoke temperature i visokog tlaka,
- proces pretvaranja toplinske energije barutnih plinova u kinetičku energiju kretanja sustava projektil – cijev – usadnik/rukohvat,
- proces kretanja plinova, barutnog punjenja, projektila i cijevi.

Ovi procesi su međusobno povezani i odvijaju se istodobno. Proces opaljenja traje oko jedne stotinke sekunde.

Tlak barutnih plinova nastalih izgaranjem barutnog punjenja djeluje na sve površine barutne komore i cijevi. Kao rezultat toga nastaje sila barutnih plinova  $F_p$  na dno projektila (slika 7), koja pokreće zrno prema ustima cijevi, te sila barutnih plinova  $F_z$  na čelo zatvarača (slika 7), koja svojim djelovanjem preko zatvarača izaziva kretanje cijevi i ostalih dijelova oružja koji su čvrsto spojeni. Sila  $F_z$  djeluje u suprotnom smjeru na smjer sile  $F_p$  i kretanja naboja i izaziva kretanje koje se naziva trzanjem (eng. recoil) [1].



**Slika 7. Presjek napunjene cijevi prije opaljenja [1]**

Barutni plinovi nastali tijekom procesa opaljenja imaju veliku unutarnju energiju. Samo manji dio te energije se koristi za kretanje zrna, dok je njezin preostali dio neiskorišten i predstavlja gubitak energije. Gubici se odnose na dio topline predan stijenkama cijevi, na svladavanje otpora kretanja zrna u cijevi, na trzanje naoružanja, na preostalu unutarnju energiju zagrijanih barutnih plinova koji izlaze iz cijevi oružja, kao i manjim dijelom na tribološke procese koji predstavljaju unutarnje trošenje cijevi [1].

### 3.1. Trošenje cijevi oružja

Cijev oružja je izložena vrlo teškim uvjetima eksploatacije, što se posebno odnosi na njezinu unutarnju površinu, glatku ili ožljebljenu. Prilikom opaljenja, u unutrašnjosti cijevi se odvijaju izrazito dinamički kemijsko-fizikalni procesi, koji uzrokuju trošenje cijevi. Intezitet toga trošenja ovisi o mnogo čimbenika, koje se može podijeliti u sljedeće skupine:

- Konstrukcijske

- Tehnološke
- Balističke
- Eksplatacijske

U konstrukcijske čimbenike spadaju: kalibar, duljina cijevi, broj žljebova, dubina, širina i profil žljebova, promjer vodećeg prstena, širina vodećeg prstena, odnosno promjer cijevi i vodećeg prstena.

Tehnološki čimbenici su: način izrade cijevi, toplinska obrada cijevi, kvaliteta materijala cijevi i vodećeg prstena. Balistički čimbenici uključuju: masu barutnog punjenja, sastav i toplinsku vrijednost baruta, tlak barutnih plinova, temperaturu barutnih plinova, zakon promjene brzine projektila u cijevi i drugo. Eksplatacijski čimbenici: režim paljbe, način hlađenja cijevi, intezitet hlađenja, čišćenje i podmazivanje cijevi, uvjeti čuvanja i drugo.

Navedeni utjecajni čimbenici ne djeluju zasebno, već istodobno na istrošenost cijevi, iako su inteziteti njihovih pojedinačnih utjecaja međusobno različiti. Tijekom dosadašnjih istraživanja došlo se do zaključka da je erozijsko djelovanje barutnih plinova najutjecajniji čimbenik u procesu trošenja cijevi oružja. Svi prethodni čimbenici djeluju isključivo kontinuirano, a posljedica toga je kontinuirano trošenje cijevi. On se ne odvija ravnomjerno po cijeloj površini kanala cijevi, najintezitivnije trošenje cijevi je upravo na prijelaznom konusu. Tu se zapažaju i prvi tragovi trošenja: sjajna površina cijevi postaje matirana, što predstavlja finu mrežu kratkih i plitkih pukotina. Povećanjem broja opaljenja, pukotine se povećavaju i sve više orentiraju u smjeru kretanja projektila.

Trošenje cijevi ima za posljedicu povećanje kalibra i promjera dna žljebova, smanjenje širine polja, nastajanje pukotina u materijalu i lomljenje dijelova polja, pomicanje prijelaznog konusa i početka ožljebljenja prema ustima cijevi. U balističkom smislu, promjena profila kanala cijevi utječe na smanjenje maksimalnog tlaka barutnih plinova, a time i na smanjenje početne brzine projektila i dometa, te na povećanje rasipanja pogodaka. Sposobnost cijevi da izdrži točno određeni broj opaljenja, a da njezine balističke osobine ne padnu ispod zadanih dopuštenih vrijednosti, naziva se balistički život cijevi. Tijekom uporabe oružja treba znati koliki je stupanj istrošenosti cijevi, da bi se moglo zaključiti kakve su promjene nastale u balističkim svojstvima oružja. Postupci za utvrđivanje stupnja istrošenosti su sljedeći:

- Mjerenje povećanja kalibra cijevi
- Vizualna procjena stanja površine kanala cijevi
- Usporedba broja opaljenja iz cijevi sa predviđenim životom cijevi

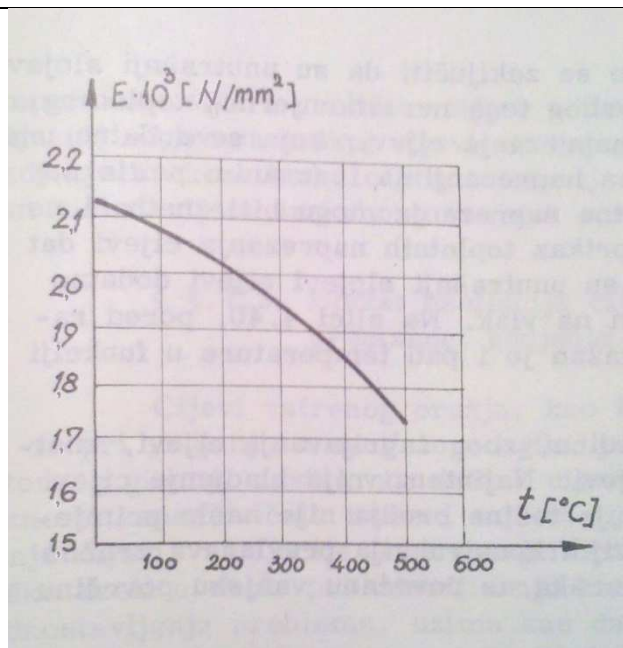
Da bi se produžio životni vijek cijevi, treba se strogo pridržavati propisa o pravilnoj uporabi i održavanju oružja [18].

### 3.2. Zagrijavanje i hlađenje cijevi pri gađanju

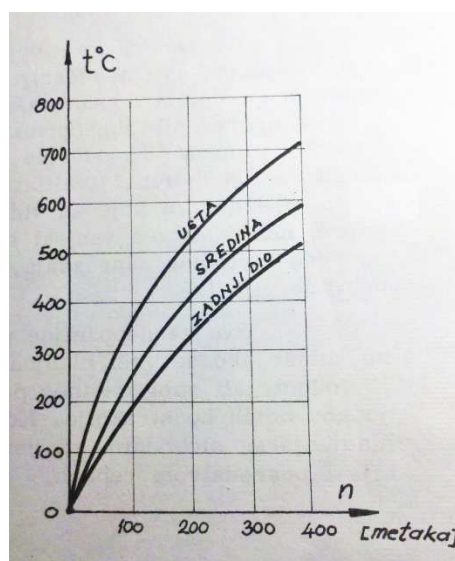
Zagrijavanje cijevi pri gađanju iz automatskog naoružanja ima čitav niz nepoželjnih posljedica kao što su:

- smanjenje trajnosti cijevi,
- pogoršanje mehaničkih svojstava materijala i smanjenje otpornosti stijenki prema visokim pritiscima u cijevi za vrijeme izgaranja baruta,
- pogoršavaju se uvjeti ekstrakcije čahure iz ležišta uslijed promjene elastičnosti materijala,
- pogoršavaju se uvjeti kretanja automatike, pogotovo kod sustava koji rade na načelu kratkog trzaja cijevi, jer se povećavaju zazori i gibanje gdje je nestabilnije,
- povećava se čeonni zazor, zbog povećane temperature stijenki, što nepovoljno utječe na funkciju oružja,
- otežano je ciljanje zbog pojačanog titranja zagrijanog zraka oko cijevi,
- savijanje cijevi zbog neravnomjernog zagrijavanja, uslijed nejednake debljine stijenki po dužini, dovodi do prevelike raspršenosti pogodaka,
- mogućnost samoopaljenja metka ako se duže zadrži u ležištu,
- ograničenje režima paljbe, a time i smanjenje borbenih sposobnosti naoružanja,
- pogoršani uvjeti opsluživanja oružja,
- potreba za većom debljinom cijevi smanjuje manevarsku sposobnost oružja.

Promjena mehaničkih svojstva cijevi prikazana je padom vrijednosti modula elastičnosti s povećanjem temperature (slika 8). Zagrijavanje cijevi pri gađanju nije ravnomjerno, kako po dužini cijevi, tako i po debljini njezinih stijenki. Na slici 9 prikazana je promjena temperature cijevi za zadnji dio, sredinu i usta cijevi, ovisno o broju ispaljenih metaka. Na dijagramu se vidi da je temperatura cijevi najviša na ustima cijevi, iako je temperatura plinova na ustima cijevi niža. To je zbog toga što je cijev na tom dijelu najtanjih stijenki pa je i odnos topline i mase najveći [17].

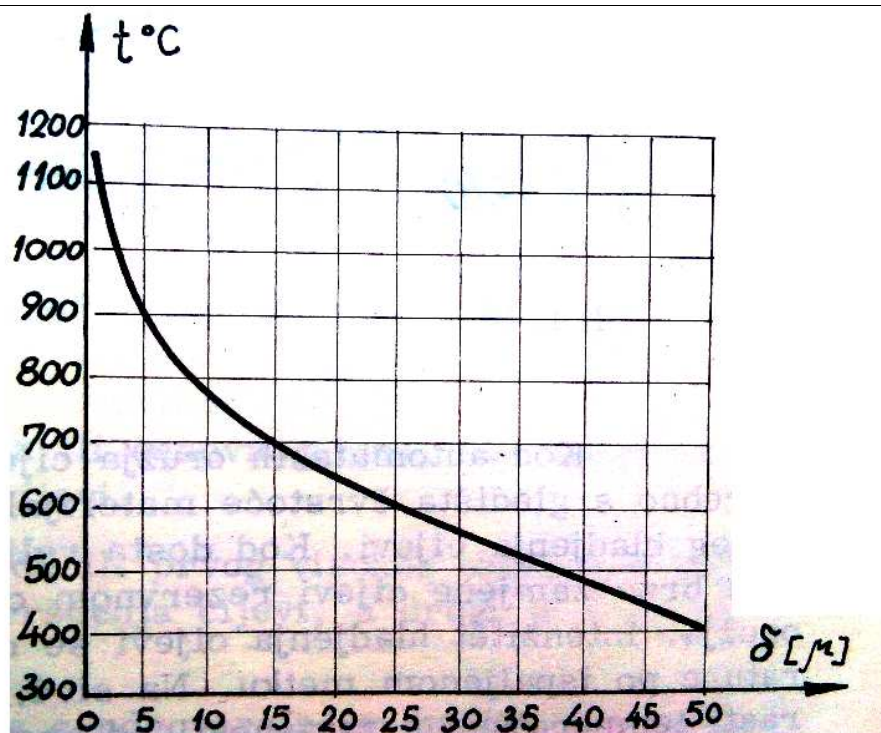


Slika 8. Promjena modula elastičnosti [17]



Slika 9. Promjena temperature po presjeku cijevi [17]

Na slici 10 se vidi kvantitativna promjena temperature cijevi po dubini stijenke cijevi. Iz ovih podataka se vidi da je temperatura cijevi najviša u unutrašnjosti cijevi, a naglo se smanjuje sa povećanjem debljine cijevi. Može se zaključiti da su unutrašnji slojevi najopterećeniji, pa zbog toga neravnomjernog toplinskog opterećenja dolazi do unutrašnjih naprezanja cijevi, koja se dodatno povećavaju s naprezanjima izazvanim pritiskom barutnih plinova. Unutrašnji dio cijevi je prema tome tlačno opterećen, dok se vanjski dio opterećuje vlačno [17].



Slika 10. Dijagram kvantitativne promjene temperature cijevi po dubini stijenke cijevi [17]

Sve nepoželjne posljedice zbog zagrijavanja cijevi znatno se ublaže ako se provodi hlađenje cijevi. Najintenzivnije hlađenje cijevi je vodom, ali zbog znatnog povećanja težine oružja, nije našlo primjenu kod novih konstrukcija. Kod novijih konstrukcija prevladava zračno hlađenje sa slobodnim strujanjem zraka uz povećanu vanjsku površinu cijevi, djelovanjem rebara i ožljebljenja. Kod automatskih oružja, cijevi su daleko deblje nego što je potrebno s gledišta čvrstoće materijala. To je uvjetovano samo boljim hlađenjem cijevi. Kod velikog broja oružja postoji mogućnost zamjene cijevi rezervnom cijevi koja pripada kompletu oružja. Intenzitet hlađenja cijevi ocjenjuje se prema porastu temperature po ispaljenom metku. Kod suvremenih oružja srednji prirast temperature po jednom ispaljenom metku je od 0.8-1.8  $^{\circ}\text{C}$  [17].

### 3.3. Mehanizmi trošenja cijevi

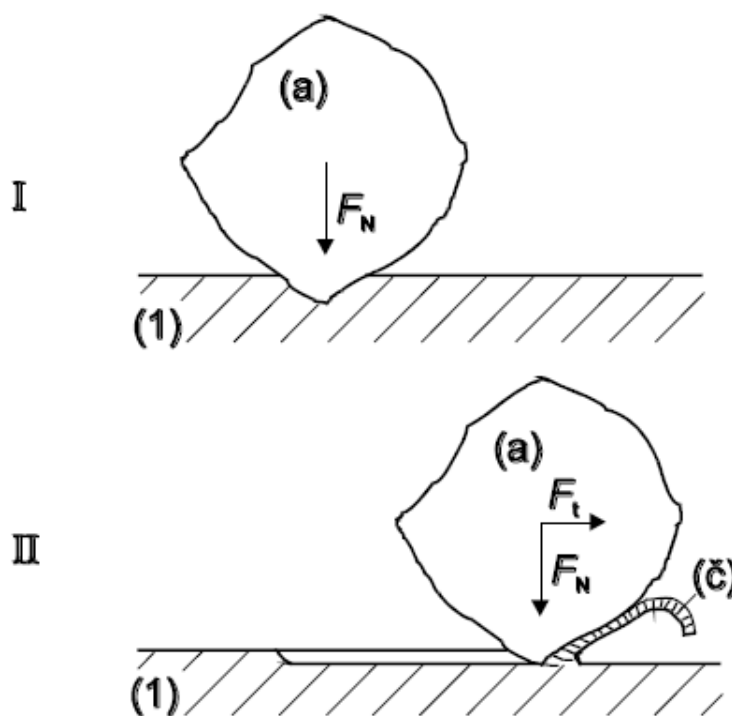
Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Proces trošenja cijevi puške sastavljen je od više elementarnih mehanizama trošenja. Kao posljedica djelovanja projektila na cijev, zajedno s djelovanjem barutnih plinova, razvijene topline, čestica čađi i baruta, te djelovanjem okolne atmosfere, najčešći i u ovom radu ispitani mehanizmi trošenja su [11]:

- abrazija
- adhezija
- erozija česticama

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina [11].

### 3.3.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Abrazija se može opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja ( slika 11) [11].



Slika 11. Jedinični događaj abrazije [11]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

- I. faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$



II. faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$

Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoće abraziva i tvrdoće materijala, abrazija se može podijeliti na tri slučaja:

- a) "čista" abrazija,
- b) selektivna abrazija,
- c) "nulta" abrazija.

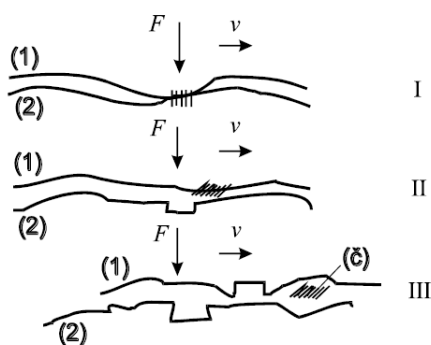
Čista abrazija nastaje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (l). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su u obliku spiralne ili lomljene strugotine, ovisno o tome je li abradirani materijal duktilan ili krhak.

Selektivna abrazija djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv "reže" samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze.

"Nulta" abrazija nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskoga graničnoga sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD, itd.) [11].

### 3.3.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje nastaje pri trenju klizanja. Dolazi do prijelaza materijala s jedne klizne plohe na drugu pri njihovom relativnom gibanju, zbog stvaranja mikrozavarenih spojeva. Otpornost na adheziju određena je sklonošću tarnog para prema stvaranju mirkozavarenih spojeva. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze (slika 12) [11].



Slika 12. Jedinični događaj adhezije [11]

I. faza - nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina.

II. faza - raskidanje adhezijskog spoja, čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para.

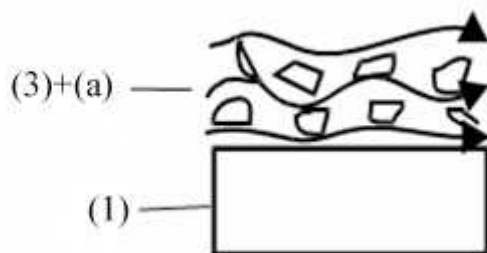
III. faza - otkidanje čestice, oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je lističast

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost.

Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru [11].

### 3.3.3. Erozijska česticama

Procesi trošenja sastoje se od dva ili više mehanizama trošenja koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima. Proces trošenja erozijom česticama (slika 13) može se opisati kao gubitak površine krutog tijela zbog strujanja fluida u kojemu se nalaze krute čestice.



Slika 13. Shematski prikaz erozije česticama [11]

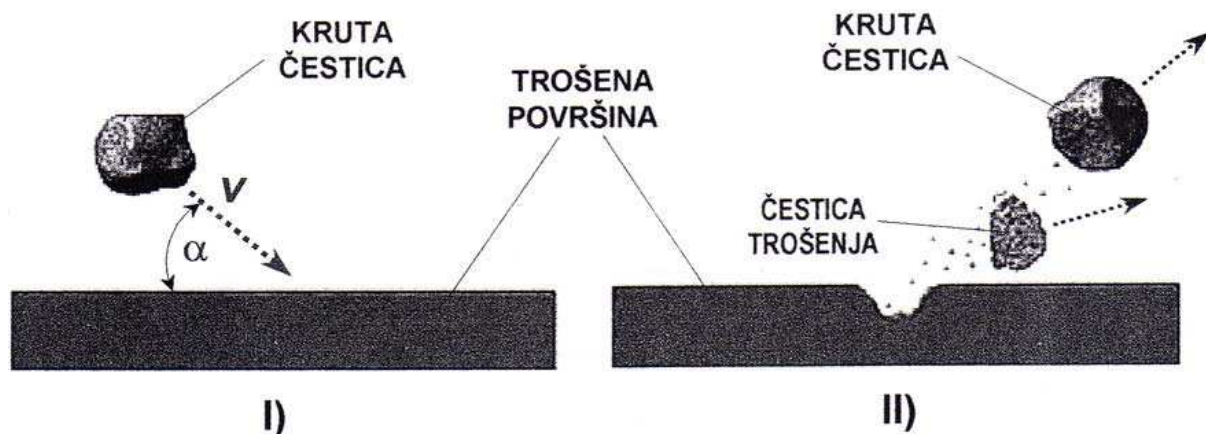
Kod erozije česticama dolazi do pojave više pojedinih mehanizama trošenja. Prema stupnjevima opasnosti od pojave, to su sljedeći mehanizmi trošenja:

- Abrazija - vrlo visoki stupanj opasnosti (abrazivna erozija),
- Umor površine - visoki stupanj opasnosti (udarna erozija),
- Tribokorozija - najniži stupanj opasnosti

Jedinični događaj erozije česticama (slika 14) sastoji se od dvije faze:

- I. faza - “upad“ krute čestice određenom brzinom gibanja i pod određenim kutom, te njezin trenutni sudar s trošenom površinom materijala,

II. faza - odbijanje krute čestice od trošene površine uz prateće razaranje površine otkidanjem djelića materijala u obliku čestice trošenja.



Slika 14. Jedinični događaj procesa erozije česticama [11]

Kut udara  $\alpha$  je definiran kao kut između erodiranog materijala i trajektorije erodivnih čestica. Ovisnost brzine erozije o kutu udara je značajno određena vrstom erodiranog materijala. Duktilni materijali, kao metali i legure, imaju najmanju otpornost na erozijsko trošenje za manje kutove, npr.  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ . Za razliku od njih, krhki materijali kao npr. staklo i keramika, najmanju otpornost na trošenje pokazuju za okomiti kut, tj. oko  $90^\circ$ . Također, o kutu udara ovisi koji će osnovni mehanizam trošenja prevladavati, prema tome kod erozijskog trošenja podjednako opasni mehanizmi trošenja mogu biti i abrazija i umor površine.

Osim kuta udara, na eroziju česticama utječu i drugi parametri [11]:

- veličina čestica,
- brzina gibanja čestica,
- oblik erodivnih čestica,
- temperatura

Kod cijevi pješačkog oružja erozija česticama se javlja i kao abrazivna erozija i kao udarna erozija. Abrazivna erozija nastaje kada čestice gareži i baruta velikom brzinom pod malim kutem udaraju u površinu kanala cijevi, te se kao posljedica javlja abrazijski mehanizam trošenja. Umor površine, kao mehanizam trošenja, nastaje zbog udarne erozije do koje dolazi kada čestice gareži i baruta velikom brzinom i pod velikim kutom udaraju u površinu kanala cijevi [11].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Analiza uzoraka materijala

U ovome radu uspoređeni su čelici iste oznake, koji su nabavljeni od dva različita proizvođača. Ispitni uzorci izrađeni su od čelika 32CrMoV12-10. Uzorci su kaljeni, poboljšani i žareni za redukciju zaostalih naprezanja.

U tablici 1. prikaza je kvantitativna analiza uzoraka koja je provedena na optičkom emisijskom spektrometru Leco GDS 850A [1].

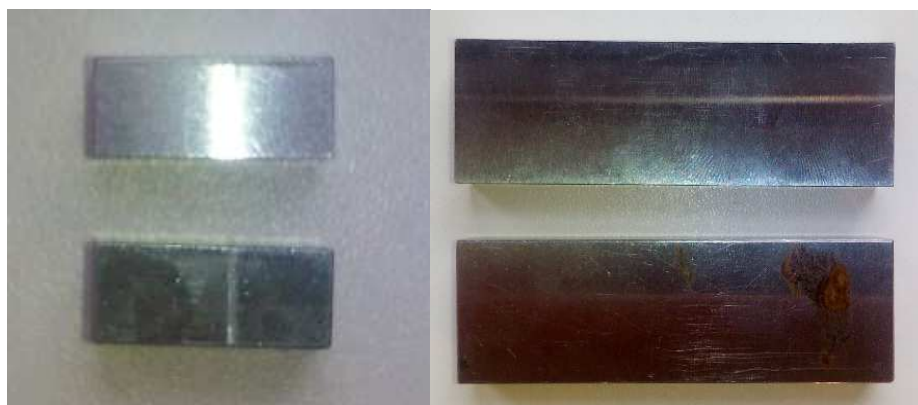
**Tablica 1. Kvantitativna analiza uzoraka [1]**

oznaka uzorka	%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Fe
1	0,35	0,27	0,45	0,010	0,001	2,68	0,31	0,88	0,01	0,27	ostatak
2	0,39	0,32	0,51	<0,01	<0,001	2,85	0,19	0,87	0,02	0,28	ostatak

Tvrdoća je izmjerena po Vickersu (HV-02), a vrijednosti tvrdoće HV-02 dvaju čelika prikazane su u tablici 2 [1].

**Tablica 2. Tvrdoće uzoraka po Vickersu [1]**

Uzorak	Tvrdoća (HV-02)
1	276
2	275



**Slika 15. Ispitni uzorci u nemodificiranom stanju**

## 4.2. Postupci modificiranja

Primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja mogu se postići značajno drugačija svojstva površine obrađenog materijala u odnosu na jezgru. To se, prije svega, odnosi na povišenje tvrdoće i otpornosti na trošenje, povećanje otpornosti na koroziju i smanjenje faktora trenja. Na taj način značajno se povećava vijek trajanja obrađivanog proizvoda. Kod postupaka modificiranja, površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti materijala, dok se kod prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini materijala [2].

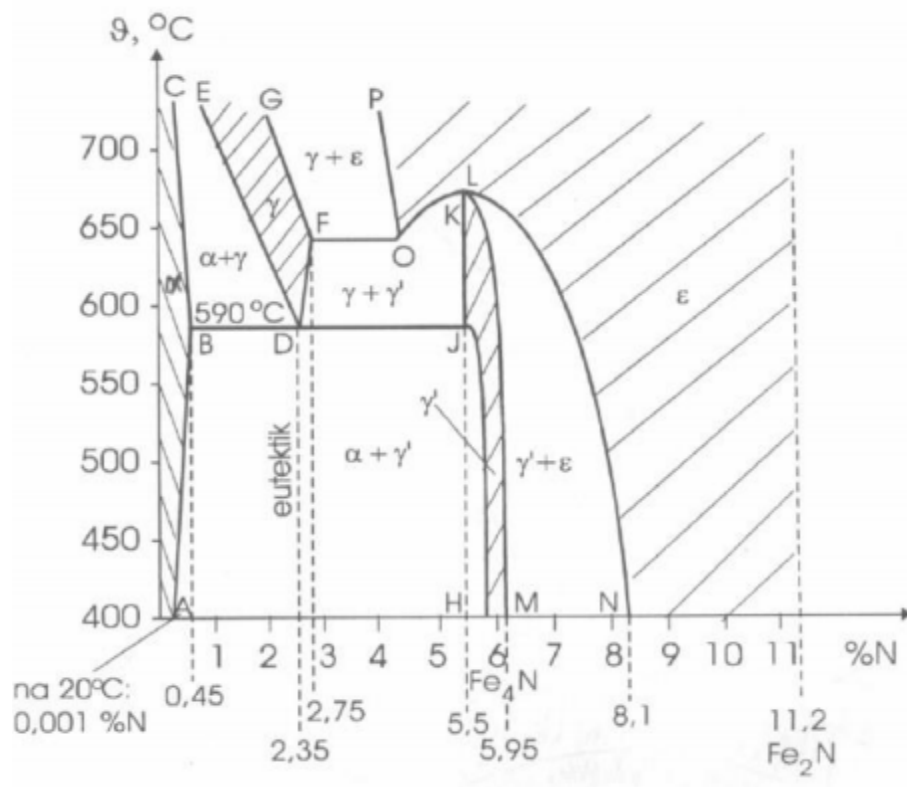
### 4.2.1. Nitiranje

Osnovni razlozi za nitiranje su sljedeći [10]:

- postizanje visoke površinske tvrdoće,
- povećanje otpornosti na trošenje (prvenstveno adhezija),
- povećanje otpornosti na umor površine,
- poboljšanje korozijske postojanosti (osim kod nehrđajućih čelika),
- postizanje površinske otpornosti na popuštanje (sve do temperatura nitiranja).

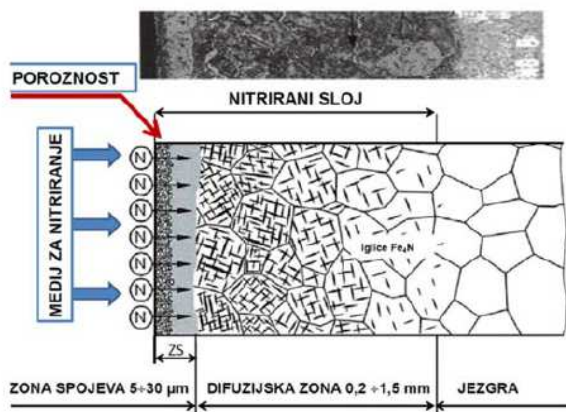
Nitiranje je toplisko-kemijski postupak modificiranja površine, koji se temelji na difuziji dušika N u površinski sloj obrađivanog predmeta. Temperatura nitiranja ispod je temperature A1, pa stoga jezgra obrađivanog predmeta ne doživljava nikakve mikrostrukturne promjene, uz uvjet da je temperatura prethodno provedenog popuštanja ili žarenja bila viša od temperature nitiranja. Nitiranjem se postiže: visoka površinska tvrdoća, povećanje otpornosti na trošenje, kontaktne pritiske, umor materijala, koroziju, trošenje i povećanje dinamičke izdržljivosti pri povišenim temperaturama, sniženje faktora trenja uz malo smanjenje žilavosti i povećanje hrapavosti površine te male ili nikakve deformacije [2].

Dušik se u nitiranom sloju može nalaziti u nekoliko faza: željezni nitridi ( $\epsilon$  i  $\gamma'$ ), nitridi legiranih elemenata i otopljenih u  $\alpha$  rešetki (slika 16). Faza  $\gamma'$  je kubično plošna rešetka, promjenljivog je sastava: 5,5...5,95 %N, te odgovara kemijskom spoju  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Faza  $\epsilon$  je heksagonska rešetka, kemijski spoj  $\text{Fe}_2\text{N}$  promjenljivog sastava: 8,1...11,2 %N [3].



Slika 16. Dijagram stanja sustava Fe-N [3]

Povišenje tvrdoće rezultat je promjene kemijskog sastava površinskog sloja pri čemu nastaje zona spojeva i/ili difuzijska zona (slika 17). Zona spojeva, često se naziva i „bijeli sloj“ debljine do 30  $\mu\text{m}$ , sastoji se od nitrida željeza ( $\text{Fe}_2\text{-3N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) i nastaje kada se premaši rastvorljivost dušika u osnovnom materijalu. Zona spojeva tvrda je i krhka. Ovisno o parametrima i vrsti postupka, moguće je postići zonu spojeva sa  $\epsilon$  ili  $\gamma'$  nitridima, odnosno sa  $\epsilon$  i  $\gamma'$  nitridima te je također moguće postići nitrirani sloj bez zone spojeva [2].



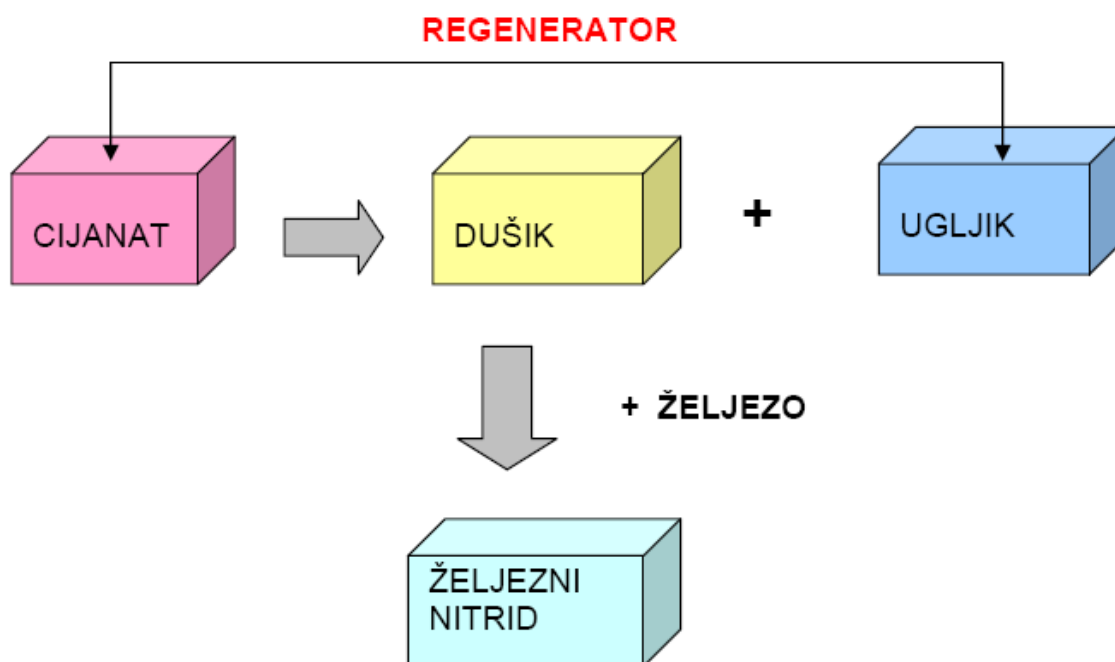
Slika 17. Mikrostruktura nitriranog sloja nakon nitriranja [4]

Ispod zone spojeva nitriranog sloja nalazi se difuzijska zona. Prilično tvrda i debela (20-1500  $\mu\text{m}$ ), nastaje otapanjem dušika u željeznoj matrici i stvaranjem intersticijskih kristala mješanaca. Dubina difuzijske zone ovisi primarno o temperaturi nitiranja te osnovnom materijalu i vremenu nitiranja [2].

#### 4.2.2. Nitiranje u solnoj kupci

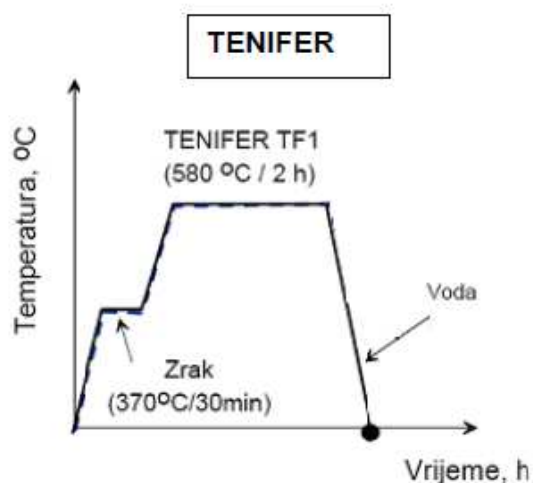
Nitiranje (odnosno nitrokarburiranje) je postupak termokemijske obrade kojim se postiže obogaćenje površinskih slojeva predmeta dušikom N i ugljikom C, a stvara se zona spojeva ispod koje se nalazi difuzijska zona obogaćena dušikom N [3].

Karakteristično je za ovaj postupak da se izvodi ispod temperature A1 čelika. Modificirati se mogu svi čelici, a sam postupak traje 2 do 4 sata. Postupak nitiranja u solnoj kupki je jednostavan za provedbu, zato jer je potrebno nadzirati samo tri parametra: temperaturu, vrijeme obrade i sastav solne kupke. Solna kupka u kojoj se provodi nitiranje sadrži alkalijeve cijanate ( $\text{Na}_2\text{O}_3$  /  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) i karbonate ( $\text{NaOCN}$  /  $\text{KOCN}$ ). Tijekom postupka nitiranja dolazi do reakcije između površine obratka i alkalijevih cijanata, što dovodi do stvaranja alkalijevog karbonata i u manjoj količini cijanida u iznosu od 0,5 – 4 % CN. Dodavanje sintetičkog regeneratora REG1 koji sadrži ugljik, dušik i vodik ponovno se uspostavlja optimalna aktivnost kupke, tvoreći aktivne nitridne konstituentne. Što se više smanjuje udio ugljika, time se povećava udio cijanida u kupki [5,6].



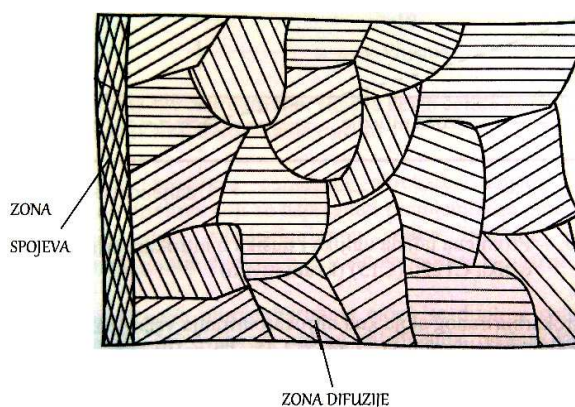
Slika 18. Prikaz osnovnih kemijskih reakcija u solnoj kupki TF1

Postupak nitiranja se sastoji od nekoliko faza (slika 19). Prva faza je predgrijavanje na zraku pri temperaturi 350 – 400 °C, u vremenu trajanja od 30 minuta. Zatim slijedi nitiranje u solnoj kupki pri temperaturi 580 °C, u vremenu trajanja od dva sata i zatim ohlađivanje obratka. Vrijeme trajanja hlađenja ovisi o dimenzijama obratka te uglavnom iznosi 15 – 30 minuta (kako bi se izjednačila temperatura površine i jezgre) [5].



**Slika 19. Dijagram postupka TENIFER [7]**

Zona spojeva (slika 20) se sastoji od željeznih karbida i željeznih nitrida tj. spojeva Fe sa C i N, ima svojstva različita od svojstva samog metala. Zona spojeva ima visoku otpornost na trošenje klizanjem. Debljina samoga sloja kod nitiranja u solnoj kupki iznosi oko 10 do 15  $\mu\text{m}$ . Postojan na koroziju, neda se nagrizati uobičajenim otopinama koje se u metalografiji upotrebljavaju, nije krhak te može podnijeti plastičnu deformaciju predmeta bez napuknuća i odlupljivanja. Zona difuzije znatno poboljšava dinamičku izdržljivost kod predmeta koji su napregnuti opterećenjima savijanja ili torzije [3].



**Slika 20. Shematski prikaz zone spojeva i dijela zone difuzije [3]**

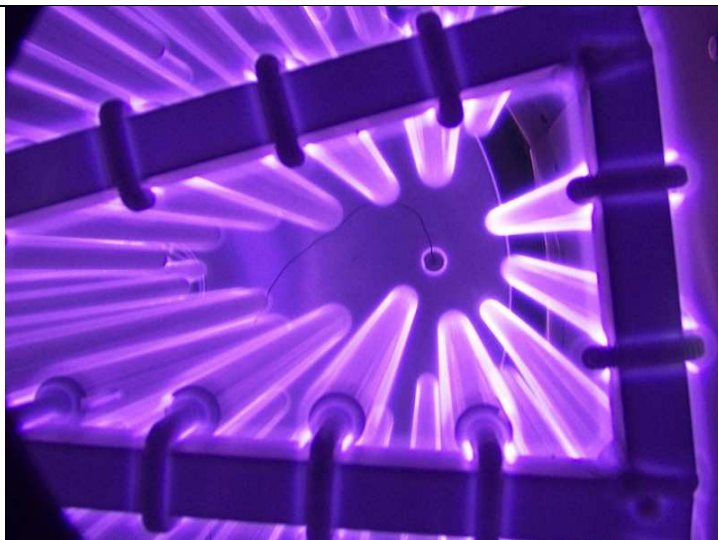




**Slika 21. Ispitni uzorci nitrirani u solnoj kupci**

#### **4.2.3. Plazmatsko nitriranje**

Plazmatsko nitriranje je toplinsko-kemijski postupak koji je razvijen kao alternativa plinskom nitriranju. Ono se provodi u vakuumu zbog veće oslobođene energije ioniziranog plina, pri čemu obrađivani predmet predstavlja katodu, dok stijenka retorte (vakuumaska komora) predstavlja anodu. Molekule uvedenog plina za nitriranje u vakuumskoj komori se pod djelovanjem visokog napona (400-1200 V) disociraju i ioniziraju. Ioni velikom brzinom udaraju i difundiraju u površinu obrađivanog predmeta, pri čemu ionizirani plin istovremeno služi i kao sredstvo za nitriranje i kao izvor topline za odvijanje procesa (udaranje iona razvija toplinu na površini obrađivanog predmeta). Udaranjem iona na površinu obrađivanog predmeta izbijaju se ili otprašuju atomi željeza, koji se pritom vežu s atomima dušika iz plazme, stvarajući željezne nitride koji se adsorbiraju ili talože na površini obrađivanog predmeta. Također, udaranjem iona dolazi do čišćenja površine obrađivanog predmeta od kisika i drugih nečistoća. Učinak čišćenja ostvaruje se prisustvom vodika koji kemijskim reakcijama reducira okside s površine čelika. Dodatkom argona postiže se još učinkovitije čišćenje zbog dodatnog otprašivanja oksida izazvanog sudarima iona argona i površinskog sloja [2].

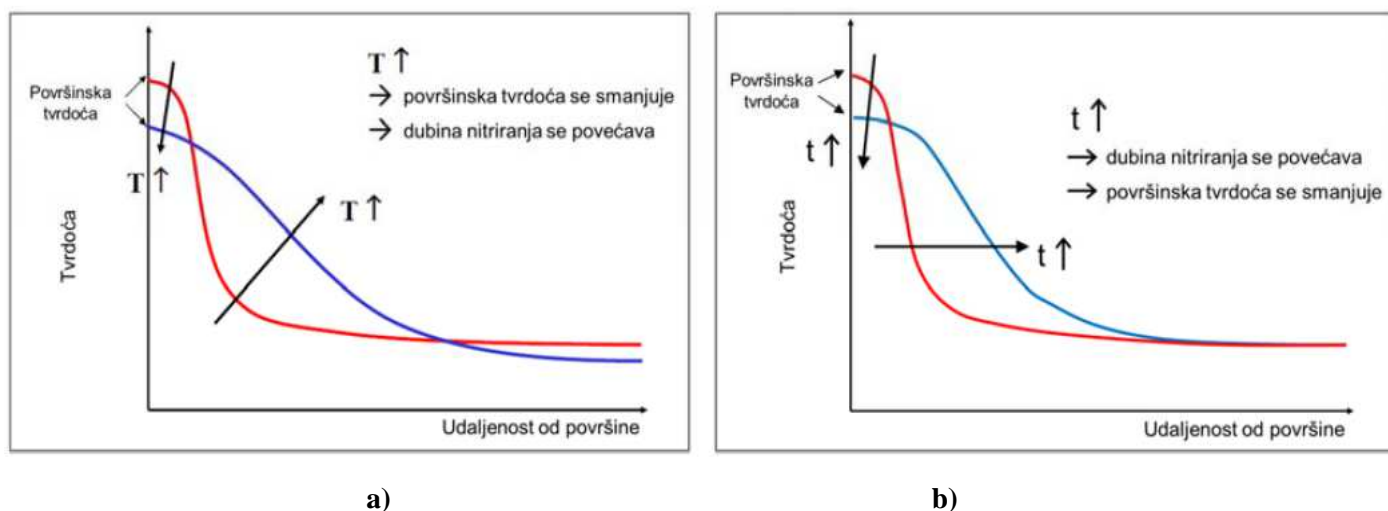


**Slika 22. Plazmatsko nitriranje vratila potopne crpke [9]**

Kao i kod ostalih postupaka nitriranja, plazmatski nitrirani sloj sastoji se od zone spojeva i difuzijske zone. Ovisno o parametrima nitriranja, zona spojeva može se sastojati od  $\epsilon$  faze i/ili  $\gamma'$  faze [8].

Na svojstva, sastav i dubinu nitriranog sloja utječu: temperatura, vrijeme procesa, sastav plinova i parametri plazme. Određeni, ali manji utjecaj, imaju i kemijski sastav i mikrostruktura obrađivanog predmeta, prethodna toplinska obrada te hrapavost površine.

Utjecaj pojedinih parametra je različit, ali u pravilu viša temperatura povećava dubinu zone spojeva i difuzijske zone, ali smanjuje površinsku tvrdoću (slika 23 ).



**Slika 23. a) Utjecaj temperature nitriranja, b) vremena nitriranja na tvrdoću i dubinu nitriranog sloja [2]**

Vremena plazmatskog nitriranja uobičajeno su kraća nego kod uobičajenih postupaka nitriranja i postižu se više tvrdoće. Povećanjem vremena plazmatskog nitriranja povećava se dubina nitriranog sloja, ali se smanjuje površinska tvrdoća. Legirajući elementi povećavaju tvrdoću nitriranog sloja, ali smanjuju dubinu uz oštiri prijelaz tvrdoće od površine prema jezgri [2,8].

Prednosti plazmatskog nitriranja u odnosu na druge postupke nitriranja [2,8]:

- mogućnost kontroliranja dubine nitriranog sloja
- mogućnost selektivnog nitriranja zaštitom površine pastama ili kemijskim putem
- uniformna tvrdoća i dubina nitriranja posebice kod predmeta složenijih geometrija
- visoka čistoća i niža hrapavost obrađivanih predmeta
- manje deformacije
- preciznija kontrola i regulacija parametara procesa
- izborom odgovarajućih parametara moguće je postići slojeve različitog faznog sastava
- manja krhkost ili ljuštenje slojeva uz više površinske tvrdoće
- ekološki prihvatljiv postupak
- mogućnost automatizacije procesa

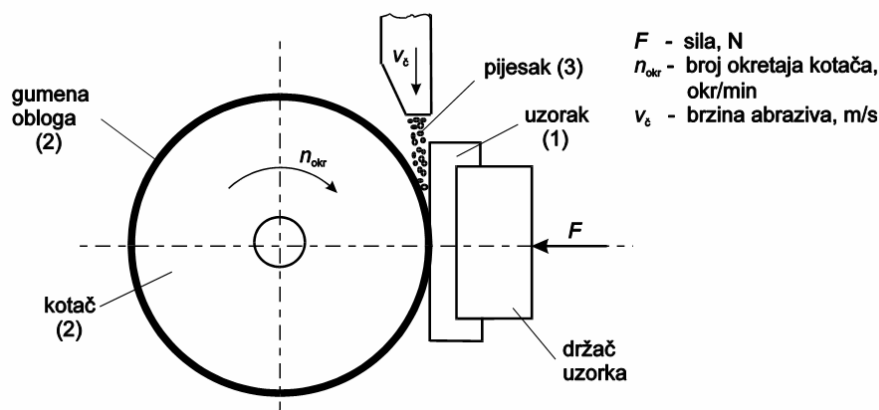
Nedostaci plazmatskog nitriranja [2,8]:

- složena i skupa oprema
- opasnost od pregrijavanja
- teškoće s homogenošću i mjerenjem temperature kod većih predmeta i složenije geometrije

#### **4.3. Ispitivanje otpornosti na abrazisko trošenje**

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja [11].

Otpornost na abrazijsko trošenje ispituje se metodom “suhi pijesak/gumeni kotač” na istoimenom uređaju. Shema (skica) uređaja prikazana je na slici 24.



Slika 24. Skica uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” [11]

Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka (1) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (3). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore-a, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila  $F$  iznosi 45 N ili 130 N, ovisno o varijanti postupka, a još je promjenljiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem. Nakon završetka ispitivanja, na uzorku ostaje trag (slici 26), gdje je prikazan i detalj uređaja sa mlaznicom.

Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja, utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ova metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala, ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija [11].

Tablica 3. Opis ispitivanja otpornosti na abraziju

Svrha ispitivanja	Određivanje otpornosti na trošenje materijala na abraziju trećim dijelom
Uzorci	Ravni (površinski modificiran) uzorak (dimenzije: $\approx 76 \times 25 \times (3,2-12,7)$ mm), u kontaktu s rotirajućim gumenim kotačem. Abrazivne čestice su čestice zaobljenog kvarcnog pijeska standardne granulacije
Uvjeti ispitivanja	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brzina rotacije kotača: <math>200 \pm 10</math> okr/min</li> <li>- Opterećenje: 45 N ili 130 N</li> <li>- Protok abraziva: 250-400 g/min</li> </ul>
Mjerenje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gubitak mase</li> <li>- Dubina traga trošenja analizom profila</li> </ul>
Vrsta trošenja	Abrazija pri malom naprezanju



Slika 25. Uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač”



Slika 26. Detalj uređaja i trag trošenja na uzorku [1]





**Slika 27. Ispitni uzorak nakon ispitivanja otpornosti na abraziju**

Gubitak mase kod ispitivanja otpornosti na abraziju, (razlika mase prije i nakon ispitivanja) mjerena je na vagi METTLER B5C 1000 (slika 28) rezolucije 0,0001 g, u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



**Slika 28. Vaga METTLER B5C 1000**

Ultrazvučno čišćenje (slika 29) temelji se na procesu koji se zove kavitacija, a predstavlja formiranje mikroskopskih mjehurića u tekućini kroz koju ultrazvuk prolazi. Mjehuri se šire

kroz tekućinu i sudaraju s površinom objekta na dodir za proizvodnju energije, koji uklanja nečistoće iz objekta koji se pročišćava. Ovi gotovo nevidljivi fini mjehuriće zbog njihove male veličine mogu prodrijeti i u najmanje pukotine, rupe, pore i ukloniti nečistoće kao što su prašina, ulje, hrđe, ulja, alge, gljivice, bakterije, vapno, čađe, vosak, itd [12].

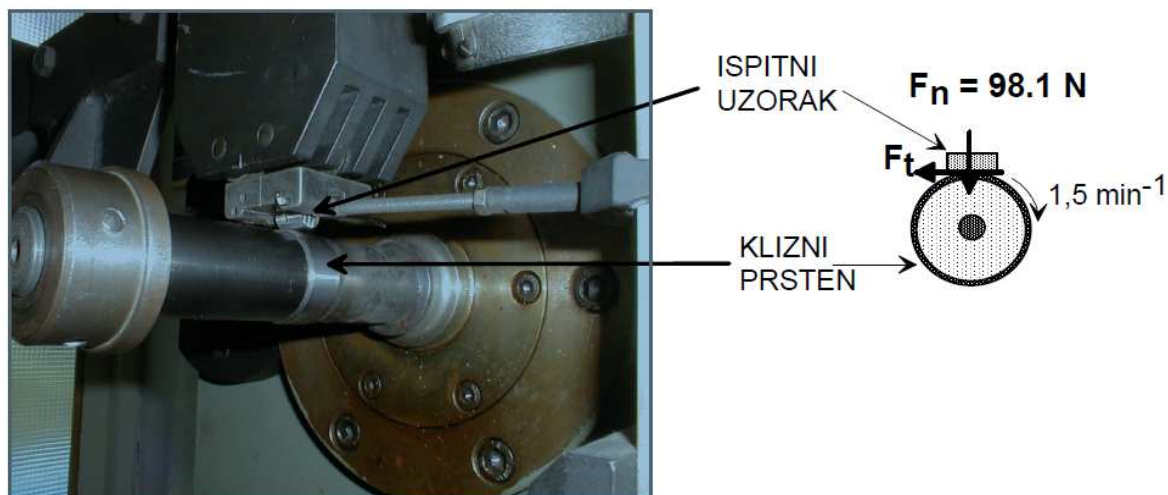
Materijali koji su prikladni za čišćenje u ultrazvučnoj kupelji su metali, plastike, stakla, keramike i gume. Čišćenje metala ultrazvukom moderna je metoda koja se provodi u posebnim kadama ispunjenima vodom ili mješavinom vode i posebnih sredstava koja pomažu čišćenju [12]. U ovom radu prije svakog mjerenja mase uzoraka, uzorci su ultrazvučno čišćeni u trajanju od 90 s.



Slika 29. Uređaj za ultrazvučno čišćenje

#### 4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

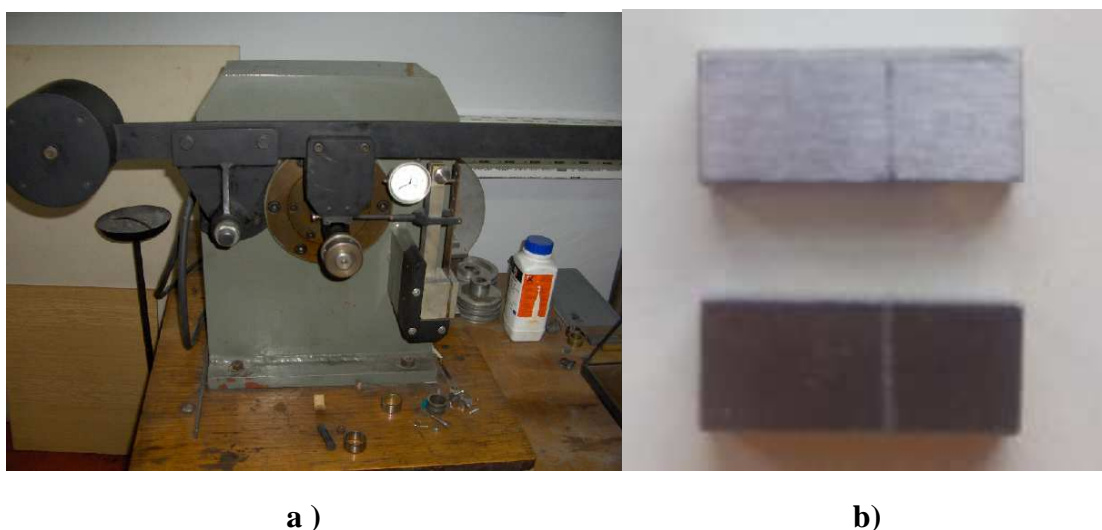
Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje provedeno je na uređaju s kliznim kontaktom ispitnog uzorka i poliranog tarnog prstena (slika 30). Tarni prsten izrađen je od čelika za valjne ležajeve. Klizni kontakt trajao je jednu minutu, uz vrlo malu brzinu klizanja ispitnog uzorka po prstenu od 0,003 m/s. Tijekom ispitivanja ispitni uzorak pritiskan je silom od  $F_N = 53,955 \text{ N}$ , okomito na smjer klizanja, a tangencijalna sila ( $F_t$ ) određena je posredno preko elastičnog produljenja opruge. Prije početka ispitivanja provedeno je ispitivanje elastičnog produljenja opruge u cilju određivanja ovisnosti  $F_t = f(Dl)$ . Faktor trenja određen je prema jednadžbi u ovisnosti o putu trošenja (s): [7].  $\mu(s) = F_t(s)/F_N$



**Slika 30. Uređaj za ispitivanje faktora trenja i shematski prikaz ispitnog uzorka i prstena [7]**

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica trenja klizanja između dviju površina koje su u dodiru u relativnom kretanju. To znači da su upravo sila trenja  $F_T$  i faktor trenja  $\mu$  pokazatelji otpornosti materijala na adhezijsko trošenje: što su vrijednosti ovih pokazatelja manje, to je otpornost na adhezijsko trošenje veća.

No, prethodna tvrdnja vrijedi samo u slučaju kada prilikom trošenja materijal ostaje u čvrstom stanju i ne dolazi do njegovog taljenja. Takav je slučaj bio i prilikom izvođenja triboloških ispitivanja opisanih u ovom radu. Kada tijekom adhezijskog trošenja dođe do taljenja površinskog sloja materijala, zbog njegove žitkosti opada faktor trenja, ali se intezitet trošenja naglo povećava [11].



**Slika 31. a) uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje b) ispitni uzorci nakon ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje**



## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

#### 5.1.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje – čelik u poboljšanom stanju

Ispitan je po jedan uzorak od svakog čelika u poboljšanom stanju. Uzorci su bili abrazivno trošeni u tri ciklusa na dvije plohe. U prvom mjerenju, mjeren je gubitak mase nakon svakog ciklusa od 100, 200 i 300 okretaja pod opterećenjem od  $F = 130$  N. Korišten je pijesak granulacije 0,063-0,315 mm, a srednje vrijednosti izmjerenog gubitka mase prikazane su u tablici 4.

U drugom mjerenju, mjeren je gubitak mase nakon svakog ciklusa od 100, 500 i 1000 okretaja pod opterećenjem od  $F = 45$  N. Primijenjen je pijesak Ottawa AFS 50/70, a srednje vrijednosti izmjerenog gubitka mase prikazane su u tablici 5.

**Tablica 4. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u prvom mjerenju**

Čelik	Gubitak mase (g) nakon određenog broja okretaja					
	100		200		300	
1	0,1102; 0,1218		0,2311; 0,2339		0,3552; 0,3358	
	srednja vrijednost	0,1160	srednja vrijednost	0,2325	srednja vrijednost	0,3455
2	0,1110; 0,1166		0,2160; 0,2204		0,3234; 0,3210	
	srednja vrijednost	0,1138	srednja vrijednost	0,2182	srednja vrijednost	0,3222

**Tablica 5. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u drugom mjerenju**

Čelik	Gubitak mase (g) nakon određenog broja okretaja					
	100		500		1000	
1	0,0237; 0,0224		0,1251; 0,1065		0,2092; 0,1667	
	srednja vrijednost	0,02305	srednja vrijednost	0,1158	srednja vrijednost	0,18795
2	0,0206; 0,0210		0,0899; 0,0794		0,1832; 0,1705	
	srednja vrijednost	0,0208	srednja vrijednost	0,08465	srednja vrijednost	0,17685

Podaci iz tablice 4 i 5 pokazuju sljedeće:

- kod prvog mjerenja je između dvaju ispitnih čelika nakon završenog ciklusa trošenja izmjereni **gubitak mase kod čelika 2 za 6,74 % manji nego kod čelika 1** (tablica 4).
- kod drugog mjerenja je izmjereni **gubitak mase kod čelika 2 za 5,90 % manji nego kod čelika 1** (tablica 5).

Analizom ovih podataka može se vidjeti da čelik broj 2 u poboljšanom stanju ima veću otpornost na abrazijsko trošenje od čelika broj 1.

#### **5.1.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje – čelik nitriran u solnoj kupci**

Ispitan je po jedan uzorak od svakog čelika nitriranog u solnoj kupci. Uzorci bili su abrazivno trošeni u tri ciklusa na dvije plohe. U prvom mjerenju, mjeren je gubitak mase nakon svakog ciklusa od 100, 200 i 300 okretaja pod opterećenjem od  $F = 130$  N. Korišten je pijesak granulacije 0,063-0,315 mm, a srednje vrijednosti izmjerenog gubitka mase prikazane su u tablici 6. U drugom mjerenju, mjeren je gubitak mase nakon svakog ciklusa od 100, 500 i 1000 okretaja pod opterećenjem od  $F = 45$  N. Korišten je pijesak Ottawa AFS 50/70, a srednje vrijednosti izmjerenog gubitka mase prikazane su u tablici 7.

**Tablica 6, Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u prvom mjerenju**

Čelik	Gubitak mase (g) nakon određenog broja okretaja					
	100		200		300	
1	0,0411; 0,0427		0,1239; 0,1176		0,2161; 0,2173	
	srednja vrijednost	0,0419	srednja vrijednost	0,1207	srednja vrijednost	0,2167
2	0,0510; 0,0485		0,1240; 0,1229		0,2195; 0,2128	
	srednja vrijednost	0,0497	srednja vrijednost	0,1234	srednja vrijednost	0,2162

**Tablica 7. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja u drugom mjerenju**

Čelik	Gubitak mase (g) nakon određenog broja okretaja					
	100		500		1000	
1	0,0101; 0,0116		0,0701; 0,0914		0,1470; 0,21162	
	srednja vrijednost	0,01085	srednja vrijednost	0,08075	srednja vrijednost	0,17931
2	0,0132; 0,0123		0,0782; 0,0780		0,1920; 0,1655	
	srednja vrijednost	0,01275	srednja vrijednost	0,0781	srednja vrijednost	0,17875

Podaci iz tablica 6 i 7 pokazuju sljedeće:

- kod prvog mjerenja je između dvaju ispitnih čelika nakon završenog ciklusa trošenja izmjereni **gubitak mase kod čelika 2 za 0,23 % manji nego kod čelika 1** (tablica 6).
- kod drugog mjerenja je izmjereni **gubitak mase kod čelika 2 za 0,31 % manji nego kod čelika 1** (tablica 7).

Analizom ovih podataka može se vidjeti da je čelik broj 2 nitriran u solnoj kupci ima veću otpornost na abrazijsko trošenje od čelika broj 1.

## 5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje

### 5.2.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje – čelik u poboljšanom stanju

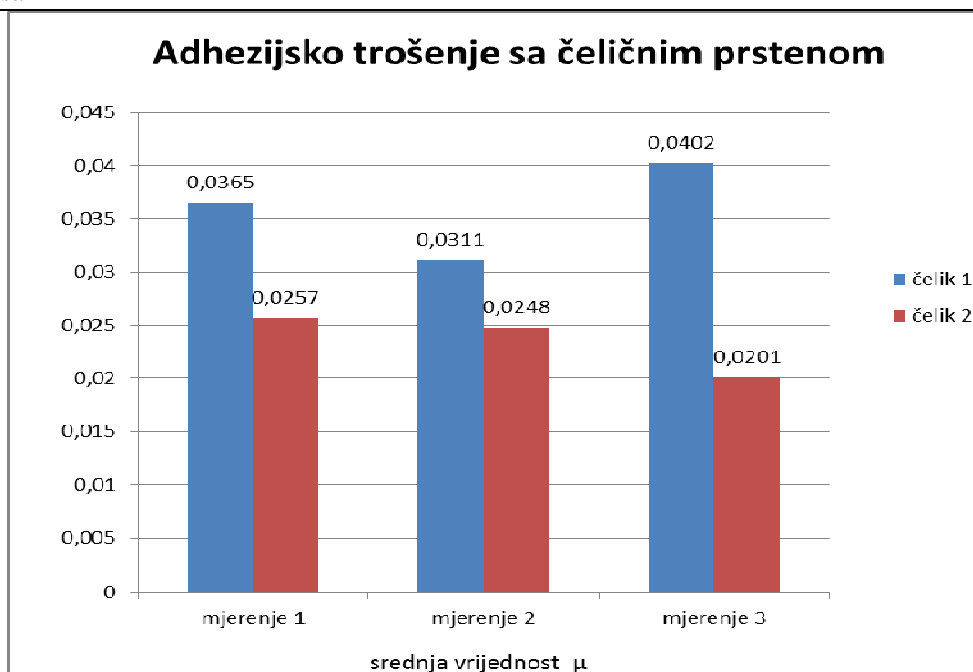
Ispitana je po jedan uzorak za svaki čelik s tri ponavljanja na čeličnom ispitnom prstenu. Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja, te nakon svakih 10 s ispitivanja. Sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelike 1 i 2 prikazani su tablicama 8 i 9 za čelični ispitni prsten.

**Tablica 8. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu**

			1. ispitivanje			2. ispitivanje			3. ispitivanje		
čelik	Ispitni prsten	t [s]	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$
1	čelični	10	1,15	1,9	0,0352	1,14	1,83	0,0339	1,19	2,18	0,0404
	čelični	20	1,15	1,9	0,0352	1,14	1,83	0,0339	1,19	2,18	0,0404
	čelični	30	1,15	1,9	0,0352	1,10	1,55	0,0287	1,20	2,25	0,0417
	čelični	40	1,17	2,04	0,0378	1,11	1,62	0,0300	1,19	2,18	0,0404
	čelični	50	1,17	2,04	0,0378	1,11	1,62	0,0300	1,18	2,11	0,0391
	čelični	60	1,17	2,04	0,0378	1,11	1,62	0,0300	1,18	2,11	0,0391

**Tablica 9. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu**

			1. ispitivanje			2. ispitivanje			3. ispitivanje		
čelik	Ispitni prsten	t [s]	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$	L [mm]	$F_T$ [N]	$\mu$
2	čelični	10	1,08	1,41	0,0261	1,09	1,48	0,0274	1,03	1,06	0,0196
	čelični	20	1,07	1,34	0,0248	1,06	1,27	0,0235	1,03	1,06	0,0196
	čelični	30	1,07	1,34	0,0248	1,05	1,20	0,0222	1,03	1,06	0,0196
	čelični	40	1,08	1,41	0,0261	1,07	1,34	0,0248	1,04	1,13	0,0209
	čelični	50	1,08	1,41	0,0261	1,07	1,34	0,0248	1,04	1,13	0,0209
	čelični	60	1,08	1,41	0,0261	1,08	1,41	0,0261	1,03	1,06	0,0196



**Slika 32. Srednje vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2**

Iz dijagrama srednjih vrijednosti faktora trenja (slika 32) može se utvrditi da postoje određene razlike kod pokazatelja otpornosti na adhezijsko trošenje, prema čemu se vidi da **materijal čelika 2 pokazuje manji faktor trenja**, odnosno veću otpornost na adhezijsko trošenje. Razlika je najizraženija za treći ciklus ispitivanja.

#### **5.2.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje – čelik nitriran u solnoj kupci**

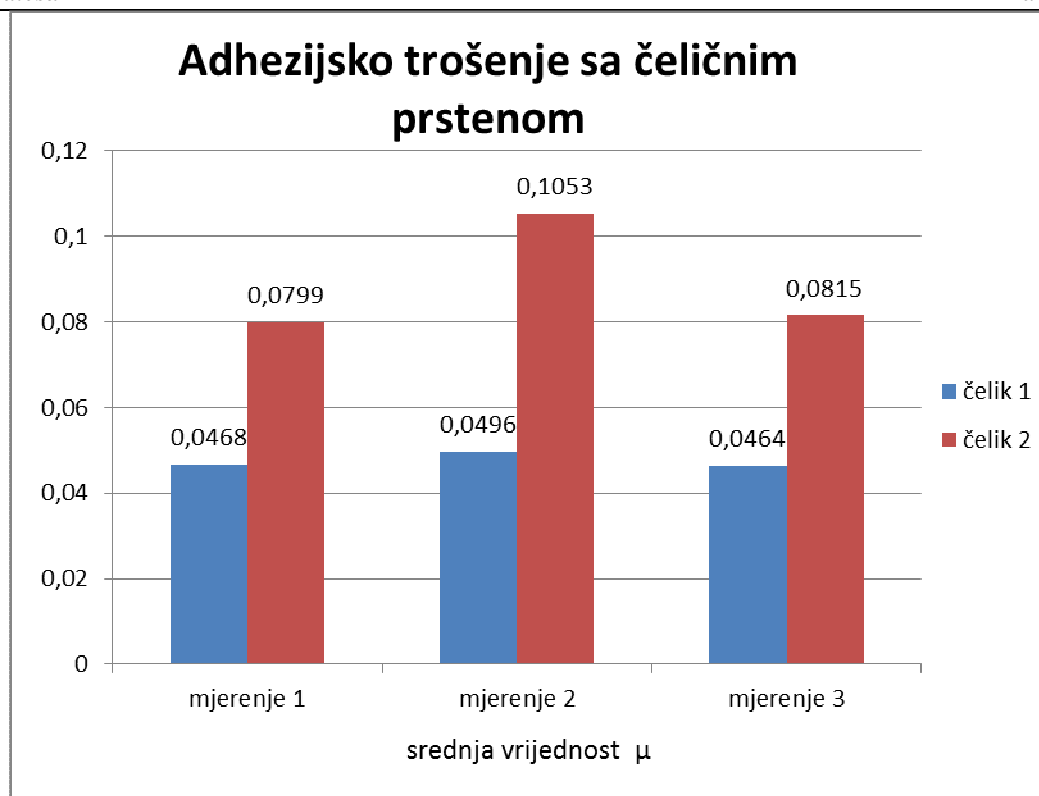
Ispitan je po jedan uzorak za svaki čelik, s tri ponavljanja na čeličnom ispitnom prstenu. Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja, te nakon svakih 10 s ispitivanja. Sila trenja  $F_T$  očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelike 1 i 2 prikazani su u tablicama 10 i 11 za čelični ispitni prsten.

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu**

			1. ispitivanje			2. ispitivanje			3. ispitivanje		
čelik	Ispitni prsten	t [s]	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ
1	čelični	10	1,30	2,95	0,0547	1,24	2,53	0,0489	1,23	2,46	0,0456
	čelični	20	1,25	2,60	0,0481	1,24	2,53	0,0489	1,24	2,53	0,0489
	čelični	30	1,23	2,46	0,0456	1,24	2,53	0,0489	1,20	2,25	0,0417
	čelični	40	1,23	2,46	0,0456	1,24	2,53	0,0489	1,25	2,60	0,0481
	čelični	50	1,20	2,25	0,0417	1,27	2,74	0,0508	1,23	2,46	0,0456
	čelični	60	1,23	2,46	0,0456	1,28	2,81	0,0521	1,25	2,60	0,0481

**Tablica 11. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu**

			1. ispitivanje			2. ispitivanje			3. ispitivanje		
čelik	Ispitni prsten	t [s]	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ	L [mm]	F <sub>T</sub> [N]	μ
2	čelični	10	1,48	4,21	0,0780	1,93	7,36	0,1364	1,40	3,65	0,0676
	čelični	20	1,50	4,35	0,0806	1,47	4,14	0,0767	1,40	3,65	0,0676
	čelični	30	1,53	4,56	0,0845	1,70	5,75	0,1066	1,34	3,23	0,0599
	čelični	40	1,48	4,21	0,0780	1,67	5,54	0,1027	1,40	3,65	0,0676
	čelični	50	1,48	4,21	0,0780	2,00	7,85	0,1084	1,75	6,1	0,1131
	čelični	60	1,50	4,35	0,0806	1,66	5,47	0,1014	1,75	6,1	0,1131



**Slika 33. Srednje vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2 nitriranih u solnoj kupci**

Iz dijagrama srednjih vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2 nitriranih u solnoj kupci (slika 33) može se utvrditi da postoje određene razlike kod pokazatelja otpornosti na adhezijsko trošenje, prema čemu se vidi da **materijal čelika 1 pokazuje manji faktor trenja**, odnosno veću otpornost na adhezijsko trošenje. Razlika je najizraženija za drugi ciklus ispitivanja.

## 6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada provedeno je ispitivanje otpornosti na trošenje ispitnih uzoraka od čelika 32CrMoV12-10, nabavljenog od dva različita proizvođača te su uzorci razvrstani u dvije skupine. Ovim se istraživanjem nastojalo utvrditi koja će se skupina uzoraka pokazati otpornijom na trošenje.

Svi ispitni uzorci bili su u poboljšanom stanju prije ispitivanja, a dio njih je nakon toga i modificiran postupkom nitriranja u solnoj kupci.

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje kod uzoraka u poboljšanom stanju pokazuju da je gubitak mase u prvom mjerenju kod čelika iz skupine 2 za 6,74% manji nego kod čelika iz skupine 1, a u drugom mjerenju, gubitak mase kod čelika iz skupine 2 manji je 5,90% nego kod čelika iz skupine 1. Materijal čelika 2 koji je nitriran u solnoj kupci, u oba mjerenja pokazuje manji gubitak mase u odnosu na materijal čelika 1. U prvom mjerenju za 0,23%, odnosno u drugom mjerenju za 0,31%.

Analizom rezultata ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje kod uzoraka u poboljšanom stanju, pokazuje da čelici iz skupine 2 za 34,51% ima manji faktor trenja u odnosu na čelik iz skupine 1. Kod uzoraka nitriranih u solnoj kupci, čelik iz skupine 1 za 46,51% ima manji faktor trenja u odnosu na čelik iz skupine 2.

Analizom rezultata ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje kod nemodificiranih i modificiranih čelika, dolazi se do sljedećeg zaključka:

- za čelik iz skupine 1, nitriran u solnoj kupci, faktor trenja se poveća za 32,24% u odnosu na poboljšano stanje.
- za čelik iz skupine 2, nitriran u solnoj kupci, faktor trenja se poveća za 377,81%, u odnosu na poboljšano stanje.

Čelik iz skupine 2 u nemodificiranom stanju pokazuje bolju otpornost na trošenje za oba mehanizma trošenja. Kod analize rezultata modificiranih čelika, čelik iz skupine 1 ima puno bolju adhezijsku otpornost, ali neznatno slabiju abrazijsku otpornost. Na trošenje cijevi utječe i niz drugih čimbenika, u prvom redu primijenjeni režim paljbe. Uz navedene čimbenike, ovisno o uvjetima održavanja i skladištenja, životni vijek cijevi može biti produljen.



Dugačak vijek uporabe cijevi, odnosno dugačak balistički život cijevi ukazuje na to da i relativno mala razlika u otpornosti na trošenje može rezultirati znatnim produljenjem vijeka uporabe oružja.

Za daljnje istraživanje predlaže se modifikacija površine kanala cijevi nitriranjem u plazmi, te mjerenje i usporedba otpornosti na trošenje tako modificiranih uzoraka.

## LITERATURA

- [1] Kerekeš N.; Završni rad, FSB, Zagreb, 2016
- [2] Kovačić S.; Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2015
- [3] Dragomir Krumes; Površinske topliske obrade i inženjerstvo površina, Slavoski brod, 2004.
- [4] [www.eucenje.fsb.hr/pluginfile.php/5839/mod\\_resource/content/1/Predavanja/10\\_pr edavanje\\_TO\\_mat.pdf](http://www.eucenje.fsb.hr/pluginfile.php/5839/mod_resource/content/1/Predavanja/10_pr edavanje_TO_mat.pdf).”.
- [5] <http://www.menzingwb.nl/mysite/modules/SFIL0100/3452e268631bbbd48f99a7bf647af70e.pdf>
- [6] F. Cajner, D. Landek, S. Šolić: Karakterizacija nitkoraburiranog sloja, MATRIB Vela Luka, 2006
- [7] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1349119469-0-cajner.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1349119469-0-cajner.pdf)
- [8] Thomas auf dem Brinke, Jurgen Crummenauer, Rainer Hans, Werner Oppel; Plasma-Assisted Surface Treatment; 2006.
- [9] <http://www.ibccoatings.com/ion-plasma-ion-nitriding-dhin>
- [10] <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=EN&site=kts&NM=117>
- [11] Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević; Tribologija, Autorizirana predavanja, 2015.
- [12] [https://ultrazvocnekopeli.si/index.php?route=product/product&product\\_id=52](https://ultrazvocnekopeli.si/index.php?route=product/product&product_id=52)
- [13] <http://www.hrvat80.4t.com/hs-xd-1.jpg>
- [14] <https://www.britannica.com/technology/assault-rifle>
- [15] <http://www.hs-produkt.hr/wp-content/uploads/2014/06/VHS-D2.png>
- [16] Vučinić O., Dinić O., Ristić T.: Pešadijsko naoružanje sa nastavom gađanja, Vojna štamparija Split, 1981
- [17] Abdul R., Cvetković M., Kravos I., Kršić N., Obrenović R., Pejčić V., Vučković D.: Osnovi klasičnog naoružanja, Tehnički školski centar KoV JNA, Zagreb, 1973
- [18] Jakopčić, M.: Osnove topničkog naoružanja, Hrvatsko vojno učilište "Petar Zrinski" Zagreb, 1996.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**